

文章编号: 1000-0615(2018)09-1358-09

DOI: 10.11964/jfc.20170910949

## 5种壳色长牡蛎不同组织中金属元素的分析与评价

朱怡静, 李琪\*, 张景晓

(中国海洋大学水产学院, 海水养殖教育部重点实验室, 山东青岛 266003)

**摘要:** 为评估不同壳色长牡蛎金属元素价值, 实采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES)和近红外(NIR)分析模型对5种壳色(壳黑、壳紫、壳橙、壳金和壳白)长牡蛎4个组织(外套膜、鳃、闭壳肌和性腺—内脏团)中的Mg、Fe、Zn、Cu、Mn和Se元素含量进行检测分析, 并比较与对照群体金属元素含量的差异以及5种壳色长牡蛎各组织间含量的差异。结果发现, 在外套膜中, 壳紫、壳橙和壳黑长牡蛎中Zn含量显著高于对照群体, 壳紫长牡蛎Cu含量显著高于壳金和对照群体, 壳金长牡蛎Mn含量显著高于壳紫和壳黑长牡蛎, 其他元素在各群体中含量无显著差异; 在鳃中, 壳金长牡蛎Mn含量显著高于壳黑和对照群体, 其他组份在6个群体无显著性差异; 在闭壳肌中, 壳橙和壳紫长牡蛎Zn的含量显著高于对照群体, 其他组份在各群体中差异不显著; 在性腺—内脏团中, 壳橙长牡蛎Zn和Mn含量均显著高于对照群体, 且Cu的含量显著高于壳金长牡蛎, 其他元素在6个群体中含量无显著性差异。4个组织中各金属元素含量差异显著, 其中闭壳肌内各金属元素含量显著低于鳃、外套膜和性腺—内脏团。研究表明, 不同壳色长牡蛎之间以及不同壳色与对照群体之间在部分金属元素含量上已表现出分化, 这为长牡蛎壳色新品系选育提供了重要的基础资料。

**关键词:** 长牡蛎; 壳色; 金属元素; 选育

**中图分类号:** S 917.4

**文献标志码:** A

颜色多态性是指在自然环境中, 一个物种的不同群体或同一个群体中不同个体中呈现2种或2种以上可遗传的分离且不连续的颜色表型<sup>[1]</sup>。早期对颜色多态性进行研究的主要是鸟的羽衣<sup>[2]</sup>和动物的体色, 如青蛙<sup>[3]</sup>、猫<sup>[4]</sup>和羊<sup>[5]</sup>等。在海洋经济动物中, 不同体色的鱼类也被用于育种研究中, 如莫桑比克罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)<sup>[6]</sup>、斑马鱼(*Barchydanio rerio* var.)<sup>[7]</sup>、鲫(*Carassius auratus*)<sup>[8]</sup>、瓯江彩鲤(*C. carpio* var. *color*)<sup>[9]</sup>、黄鳍(*Monopterus albu*)等<sup>[10]</sup>, 在养殖过程中, 体色多态性常和其生长性状与肉质等联系在一起。壳色多态性在海产经济贝类中普遍存在, 主要在皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)<sup>[11]</sup>、海湾扇贝(*Argopecten irradians irradians*)<sup>[12]</sup>、文蛤(*Meretrix meretrix*)<sup>[13]</sup>和长牡蛎(*Crassostrea gigas*)<sup>[14]</sup>等有研

究。贝类美观的壳色不仅会影响消费者的喜好, 遗传学家、育种学家的兴趣, 还显著提高了商品的价值<sup>[15]</sup>。因此, 壳色作为一个重要的选育性状, 已经成为育种工作者的一个研究热点<sup>[16]</sup>。

长牡蛎又称太平洋牡蛎, 是世界上养殖范围最广、产量最高的重要经济贝类, 具有繁殖力高、营养丰富等优点<sup>[17]</sup>。2015年中国牡蛎的年产量超过457万t, 占全国贝类养殖总产量的33.7%<sup>[18]</sup>。近年来因自然环境条件恶化, 牡蛎出现抵抗力下降、夏季死亡率高、生长速度下降等现象, 致使养殖企业经济效益降低, 开展长牡蛎新品种选育是解决这一问题的有效途径。选择育种是新品种培育的有效方法, 通过多代人工选育, 分别培育出了壳黑、壳紫、壳橙、壳金和壳白5种壳色长牡蛎新品系(图1)。

收稿日期: 2017-09-03 修回日期: 2017-09-20

资助项目: 山东省重点研发计划(2016ZDJS06A06); 青岛市产业培育计划(17-3-3-64-nsh)

通信作者: 李琪, E-mail: qili66@ouc.edu.cn

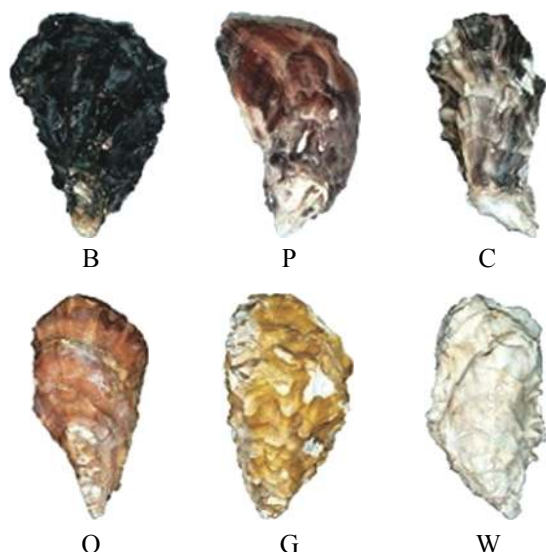


图1 5种壳色长牡蛎选育群体与普通对照群体

B: 壳黑; P: 壳紫; C: 对照群体; O: 壳橙; G: 壳金; W: 壳白

Fig. 1 The *C. gigas* with five shell colors and common shell

B: black shell; P: purple shell; C: common shell; O: orange shell; G: golden shell; W: white shell

目前, 关于不同壳色海洋贝类金属元素含量的差异性研究已有一些报道。陈炜等<sup>[11]</sup>报道了红壳和绿壳皱纹盘鲍矿物元素成分, 发现2种壳色皱纹盘鲍矿物元素含量差异显著。王波等<sup>[19]</sup>比较了杂色鲍黄壳色突变体与正常壳色个体矿物

元素含量, 结果显示黄壳色个体足肌中Ca和Al的含量显著高于正常壳色群体( $P < 0.05$ ), 而Cu的含量却显著低于正常壳色群体( $P < 0.05$ )。关于长牡蛎金属元素含量方面虽有研究<sup>[20-21]</sup>, 但对其不同壳色长牡蛎之间金属元素含量是否存在差异尚未见报道。

本实验以5种壳色长牡蛎为研究对象, 通过对其外套膜、鳃、闭壳肌、性腺—内脏团的金属元素含量组成进行比较分析, 全面了解不同壳色群体之间矿物元素含量的异同点; 通过比较长牡蛎壳色选育群体与对照群体各组织金属元素的差异, 评估长牡蛎壳色选育群体的营养价值, 以期为长牡蛎优良品种的选育提供基础资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

5种壳色长牡蛎第5代选育群体(2龄)于2016年1月采自山东省乳山海域, 对照群体是同期同海域的商业养殖群体。

### 1.2 形态学参数测定

样品活体运回实验室, 将牡蛎壳表面的杂质洗刷干净后, 测量壳长、壳宽、壳高和湿重(表1)。

表1 5种壳色长牡蛎选育群体与对照群体的形态学参数

Tab. 1 Morphological traits of five shell color strains and control group of *C. gigas*

形态学参数 morphological traits	壳黑 black shell	壳紫 purple shell	壳橙 orange shell	壳金 golden shell	壳白 white shell	对照 control
壳长/cm shell length	5.33±0.10	5.78±0.47	5.23±0.24	5.60±0.35	5.37±0.68	4.85±0.39
壳宽/cm shell width	3.32±0.78	3.44±0.12	2.92±0.35	2.86±0.25	3.15±0.23	3.35±0.34
壳高/cm shell height	9.92±0.62	10.31±0.74	8.21±0.59	10.72±0.57	10.12±0.37	9.86±0.71
湿重/g wet weight	7.01±0.44	8.03±1.17	6.51±1.47	8.24±1.38	9.63±1.69	7.13±1.65

### 1.3 样品处理

每种壳色长牡蛎取3只作为1组分析样品, 设置3个重复进行测定。解剖取外套膜、鳃、闭壳肌、性腺—内脏团各组织, 迅速冷冻于-80℃冰箱中保存。4种待测组织样品经冷冻干燥机干燥, 研磨成粉, 置干燥器中供成分测定分析。

### 1.4 金属元素的测定

称取冷冻干燥后研磨成粉的样品0.3 g于凯

氏定氮烧瓶中, 加入高氯酸, 在电炉上高温加热, 使之充分消解。样品消解后分多次转移至100 mL容量瓶中, 用超纯水定容。采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES; VISTA-MPX, VARIAN)对Mg、Fe、Zn、Cu和Mn含量进行测定。利用Wang等<sup>[22]</sup>构建的近红外(NIR)(Antaris MX, Thermo Fisher, USA)分析模型对Se元素含量进行测定。

### 1.5 数据处理

采用SPSS 21.0分析软件对各实验组做初步

统计处理后,用单因素方差分析(One-Way ANOVA)和Tukey氏多重比较进行分析,统计值采用平均值±标准差(mean±SD)表示,以 $P<0.05$ 作为差异显著性水平。

## 2 结果

### 2.1 5种壳色长牡蛎选育群体与对照组外套膜的金属元素含量比较

5种壳色长牡蛎选育群体与对照组外套膜各金属元素含量比较,结果发现常量元素Mg含量丰富,为7.21~10.37 g/kg,其中壳黑和壳橙长牡蛎含量略高,壳白和对照组群体含量略低,方差分析结果显示,6个群体之间不存在显著性差异( $P>0.05$ )。微量元素Zn含量为1.90~3.59 g/kg,其中,壳紫、壳黑和壳橙长牡蛎显著高于对照组长牡蛎( $P<0.05$ ),壳金和壳白长牡蛎之间Zn元素含量差异不显著( $P>0.05$ )。Fe元素含量为0.54~0.81 g/kg,且壳橙长牡蛎含量最高,壳白长牡蛎含量最低,6个群体之间差异不显著( $P>0.05$ )。Cu元素含量为0.34~0.75 g/kg,壳紫长牡蛎显著高于壳金和对照组长牡蛎( $P<0.05$ ),壳黑、壳橙和壳白长牡蛎之间Cu元素含量不存在显著性差异( $P>0.05$ )。Mn元素含量为7.95~14.82 mg/100 g,单因素方差分析显示,壳金长牡蛎中的Mn含量显著高于壳紫和壳黑长牡蛎( $P<0.05$ ),壳橙、壳白和对照组之间的Mn元素含量差异不显著( $P>0.05$ ,图2)。

### 2.2 5种壳色长牡蛎选育群体与对照组鳃的金属元素含量比较

鳃中Mg元素含量为7.67~8.71 g/kg,其中壳紫和壳橙长牡蛎含量略高,壳金和壳黑长牡蛎含量略低;微量元素Zn含量为2.15~3.05 g/kg,壳橙长牡蛎含量最高,壳金长牡蛎含量最低;在Fe元素含量的比较中,含量最高的是壳紫长牡蛎(1.26 g/kg),最低的是壳金长牡蛎(0.70 g/kg);Cu元素含量为0.38~0.58 g/kg;Se含量为3.92~5.12 mg/kg;单因素方差分析结果显示,6个群体之间在上述几种金属元素中均不存在显著性差异( $P>0.05$ )。Mn元素含量为17.74~28.56 mg/100 g,方差分析显示,壳金长牡蛎Mn元素含量显著高于壳黑长牡蛎和对照组群体( $P<0.05$ ),壳橙、壳白和壳紫长牡蛎之间Mn元素含量差异不显著( $P>0.05$ ,图3)。

### 2.3 5种壳色长牡蛎选育群体与对照组闭壳肌的金属元素含量比较

闭壳肌中常量元素Mg含量为4.29~5.67g/kg,其在壳黑长牡蛎中含量最高,壳白长牡蛎中含量最低;Fe元素含量为0.41~0.68 g/kg,壳黑和壳橙长牡蛎含量略高,对照组含量略低;Cu、Mn和Se含量在6个群体中基本差异不大,其范围分别为0.09~0.19 g/kg、3.37~4.57 mg/100 g和0.80~1.58 mg/kg。方差分析显示,各金属元素在6个群体中差异不显著( $P>0.05$ )。在Zn元素含量的

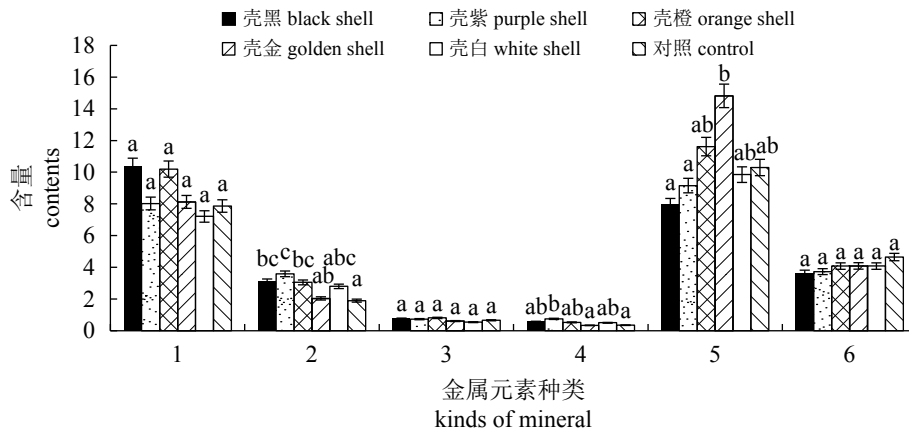


图2 5种壳色长牡蛎选育群体与对照群体外套膜的金属元素含量

1. 镁/(g/kg), 2. 锌/(g/kg), 3. 铁/(g/kg), 4. 铜/(g/kg), 5. 锰/(mg/100 g), 6. 硒/(mg/kg)。同一元素对应的不同小写字母表示有显著差异( $P<0.05$ )

Fig. 2 Mineral contents of mantles between five shell color strains and control group of *C. gigas*

1. Mg/(g/kg), 2. Zn/(g/kg), 3. Fe/(g/kg), 4. Cu/(g/kg), 5. Mn/(mg/100 g), 6. Se/(mg/kg). Different letters in the same mineral indicate significant difference ( $P<0.05$ )

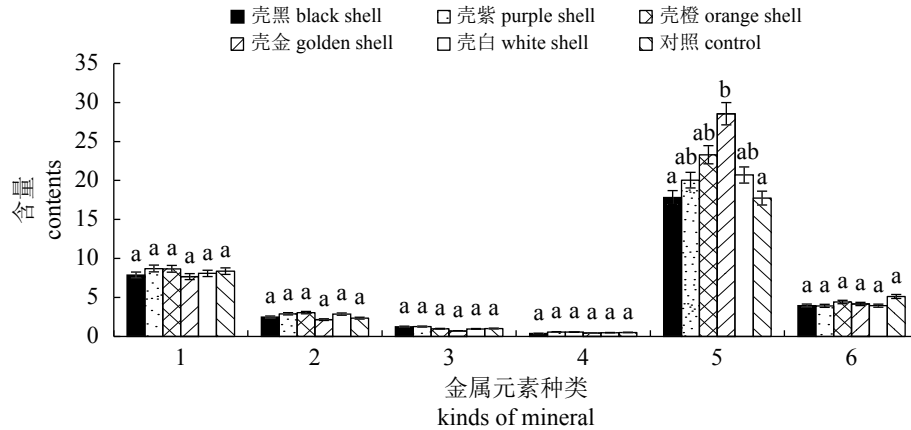


图3 5种壳色长牡蛎选育群体与对照群体鳃的金属元素含量

1. 镁/(g/kg), 2. 锌/(g/kg), 3. 铁/(g/kg), 4. 铜/(g/kg), 5. 锰/(mg/100 g), 6. 硒/(mg/kg)。同一元素对应的不同小写字母表示有显著差异(P<0.05)

Fig. 3 Mineral contents of gill between five shell color strains and control group of *C. gigas*

1. Mg/(g/kg), 2. Zn/(g/kg), 3. Fe/(g/kg), 4. Cu/(g/kg), 5. Mn/(mg/100 g), 6. Se/(mg/kg). Different letters in the same mineral indicate significant difference (P<0.05)

比较中, 含量最高的是壳紫(0.78 g/kg)和壳橙长牡蛎(0.77 g/kg), 最低的是对照组长牡蛎(0.41 g/kg), 且壳紫和壳橙长牡蛎Zn含量显著高于对照组长牡蛎(P<0.05), 壳黑、壳白和壳金长牡蛎之间Zn元素含量差异不显著(P>0.05, 图4)。

### 2.4 5种壳色长牡蛎选育群体与对照组性腺—内脏团的金属元素含量比较

5种壳色长牡蛎选育群体与对照组群体性腺—内脏团的Mg含量为4.48~6.44 g/kg, 壳黑和壳橙长牡蛎含量略高, 壳金和对照组长牡蛎含量略

低; Fe和Se的含量范围分别为1.04~2.18 g/kg和3.42~4.74 mg/kg (图5); 方差分析结果显示, 上述3种金属元素在6个群体之间差异不显著(P>0.05)。微量元素Zn含量为1.34~2.87 g/kg, 壳橙长牡蛎含量显著高于对照组(P<0.05), 壳黑、壳紫、壳白和壳金长牡蛎之间Zn元素含量差异不显著(P>0.05)。Cu元素含量为0.29~0.57 g/kg, 其中壳橙长牡蛎含量显著高于壳金长牡蛎(P<0.05), 壳紫、壳白、壳黑和对照组长牡蛎之间Cu元素含量差异不显著(P>0.05)。在Mn元素含量的比较中, 含

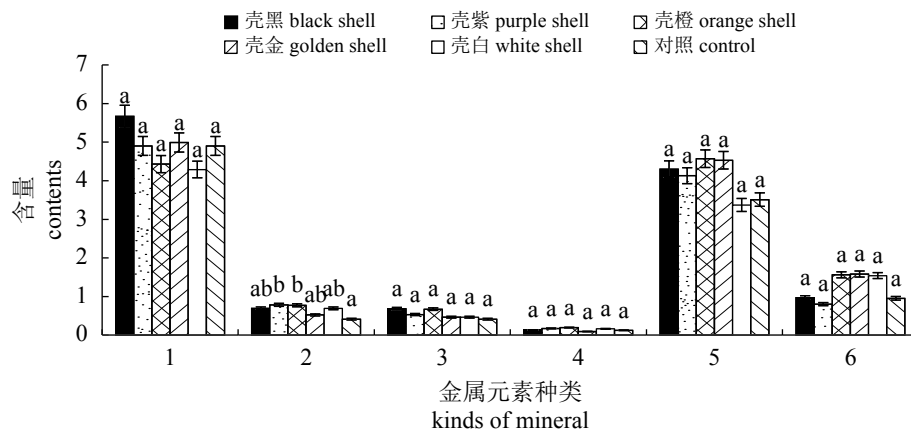


图4 5种壳色长牡蛎选育群体与对照群体闭壳肌的金属元素含量

1. 镁/(g/kg), 2. 锌/(g/kg), 3. 铁/(g/kg), 4. 铜/(g/kg), 5. 锰/(mg/100 g), 6. 硒/(mg/kg)。同一元素对应的不同小写字母表示有显著差异(P<0.05)

Fig. 4 Mineral contents of adductor muscle between five shell color strains and control group of *C. gigas*

1. Mg/(g/kg), 2. Zn/(g/kg), 3. Fe/(g/kg), 4. Cu/(g/kg), 5. Mn/(mg/100 g), 6. Se/(mg/kg). Different letters in the same mineral indicate significant difference (P<0.05)



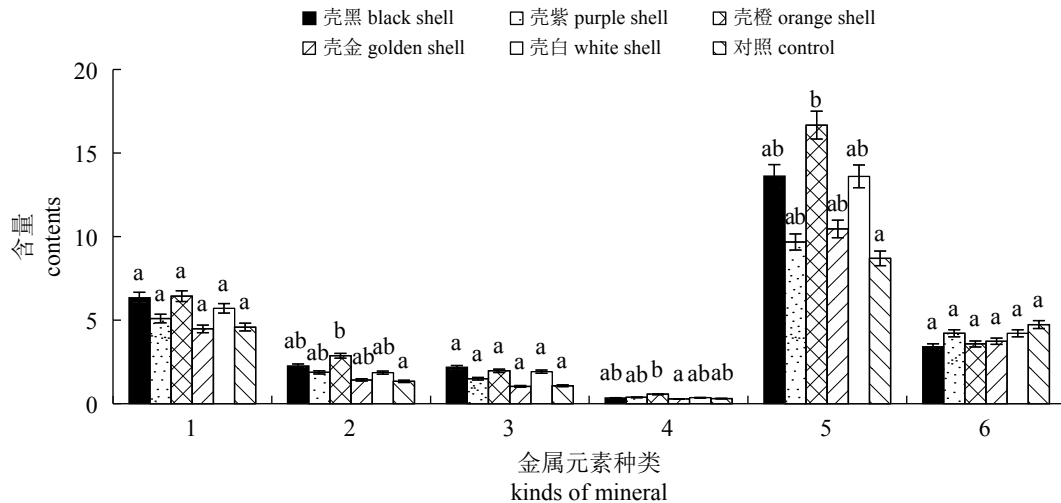


图5 5种壳色长牡蛎选育群体与对照群体性腺—内脏团的金属元素含量

1. 镁/(g/kg), 2. 锌/(g/kg), 3. 铁/(g/kg), 4. 铜/(g/kg), 5. 锰/(mg/100 g), 6. 硒/(mg/kg)。同一元素对应的不同小写字母表示有显著差异( $P<0.05$ )

Fig. 5 Mineral contents of gonad-visceral mass between five shell color strains and control group of *C. gigas*

1. Mg/(g/kg), 2. Zn/(g/kg), 3. Fe/(g/kg), 4. Cu/(g/kg), 5. Mn/(mg/100 g), 6. Se/(mg/kg). Different letters in the same mineral indicate significant difference ( $P<0.05$ )

量最高的是壳橙长牡蛎(16.67 mg/100 g), 最低的是对照组长牡蛎(8.70 mg/100 g), 且壳橙长牡蛎显著高于对照组长牡蛎( $P<0.05$ ), 壳黑、壳白、壳金和壳紫长牡蛎间的Mn元素含量差异不显著( $P>0.05$ )。

## 2.5 长牡蛎4个组织的金属元素含量比较

长牡蛎全部个体4个组织金属元素含量分析结果显示, 常量元素Mg在外套膜和鳃上的含量显著高于性腺—内脏团和闭壳肌( $P<0.05$ ), 性腺—内脏团和闭壳肌间Mg元素含量差异不显著( $P>0.05$ )。Zn元素含量在外套膜中显著高于性腺—内脏团和闭壳肌( $P<0.05$ ), 鳃和性腺—内脏团上的Zn含量差异不显著( $P>0.05$ )。性腺—内脏团和鳃中Fe元素含量差异显著( $P<0.05$ ), 且二者显著高于闭壳肌( $P<0.05$ ), 外套膜和闭壳肌中Fe元素含量差异不显著( $P>0.05$ )。Mn元素在鳃上的含量显著高于性腺—内脏团和闭壳肌( $P<0.05$ ), 外套膜和性腺—内脏团之间Mn元素含量差异不显著( $P>0.05$ ), 但显著高于闭壳肌( $P<0.05$ )。Cu元素和Se元素含量在外套膜、鳃和性腺—内脏团之间的含量差异不显著( $P>0.05$ ), 但均显著高于闭壳肌( $P<0.05$ )(表2)。

## 3 讨论

很多金属元素尤其是微量元素, 是人体必

不可少的元素, 但是不能通过自身合成, 食物则成为一种安全有效的补充微量元素的途径。长牡蛎是一种营养丰富、肉味鲜美、含有多种微量元素的海洋经济贝类, 因而成为现代人类健康食物。与其他双壳贝类相比, 本实验中长牡蛎体内组织Zn元素平均含量为1.99 g/kg, 高于文蛤(*Meretrix lusoria*) (83.63 mg/kg)<sup>[23]</sup>、杂色鲍(*Haliotis diversicolor*) (59.55 mg/kg)<sup>[19]</sup>和条纹帘蛤(*Chamelea gallina*) (77.76 mg/kg)<sup>[24]</sup>; Fe元素含量平均为0.97 g/kg, 高于文蛤 (0.7 g/kg)<sup>[23]</sup>、杂色鲍 (0.22 g/kg)<sup>[19]</sup>和条纹帘蛤(0.11 g/kg)<sup>[24]</sup>; Se元素平均含量为3.38 mg/kg, 略高于条纹帘蛤(3.33 mg/kg)。结果表明, 长牡蛎中Zn、Fe和Se等微量元素含量丰富, 是一种优质的海味佳品。

金属元素是构成机体组织和维持正常生理功能的重要物质, 与人类的生存和健康息息相关<sup>[25]</sup>。Mg作为一种辅酶, 在维持细胞内外平衡具有至关重要的作用<sup>[26]</sup>。中国营养学会发布的《中国居民膳食营养素参考摄入量(DRI)》推荐成年人每天Mg的摄入量为350 mg/d。Zn在基因表达、细胞生长和分化调控以及免疫反应等方面起重要作用, 对于人体正常生长和发育必不可少<sup>[27]</sup>。DRI推荐成人每天Zn的摄入量为11.5 mg/d(女)和15.0 mg/d(男)。Fe具有酶的功能, 与多种物质的代谢有关, 缺铁会导致儿童发育迟缓和智力障碍<sup>[28]</sup>。DRI推荐成人每天Fe的摄入量为20.0 mg/d

表2 长牡蛎不同组织金属元素的平均含量

Tab. 2 Mean contents of minerals of different body parts of *C. gigas*

不同组织 different body parts	金属元素含量 mineral contents					
	Mg/(g/kg)	Zn/(g/kg)	Fe/(g/kg)	Cu/(g/kg)	Mn/(mg/100 g)	Se/(mg/kg)
外套膜 mantle	8.63±1.32 <sup>b</sup>	2.75±0.66 <sup>c</sup>	0.69±0.10 <sup>ab</sup>	0.51±0.15 <sup>b</sup>	10.62±2.39 <sup>b</sup>	4.05±0.36 <sup>b</sup>
鳃 gill	8.23±0.43 <sup>b</sup>	2.63±0.36 <sup>bc</sup>	1.03±0.21 <sup>b</sup>	0.49±0.07 <sup>b</sup>	21.36±4.09 <sup>c</sup>	4.25±0.47 <sup>b</sup>
闭壳肌 adductor muscle	4.86±0.49 <sup>a</sup>	0.64±0.15 <sup>a</sup>	0.54±0.12 <sup>a</sup>	0.14±0.04 <sup>a</sup>	4.07±0.51 <sup>a</sup>	1.23±0.36 <sup>a</sup>
性腺—内脏团 gonad-visceral mass	5.44±0.86 <sup>a</sup>	1.94±0.57 <sup>b</sup>	1.62±0.48 <sup>c</sup>	0.38±0.10 <sup>b</sup>	12.12±3.02 <sup>b</sup>	3.99±0.49 <sup>b</sup>

注: 同列数据肩标不同小写字母表示有显著差异( $P<0.05$ )

Notes: Different letters in the same row indicate significant difference ( $P<0.05$ )

(女)和15.0 mg/d(男)。Cu在细胞生理学中起着关键作用。Mn参与碳水化合物、脂肪及蛋白质的代谢。Se作为一种抗氧化剂,在器官的发育和功能中起着至关重要的作用。DRI推荐成人每天Se的摄入量为50 μg/d。因此,长牡蛎是一种安全的微量元素补充食品,经常食用长牡蛎有利于补充Zn、Fe、Cu、Se等微量元素,减少营养失衡的现象。

天然有机色素常见的有类胡萝卜素和卟啉。在双壳贝类中,色素由外套膜产生并沿着生长边缘结合到壳中,随着时间的推移,其位置随着新壳的添加而不断变化<sup>[29]</sup>。有研究表明,在贝壳中部分金属元素可与有机色素中的卟啉结合形成金属卟啉,卟啉结合的金属元素不同表现出来的颜色不同,且随着各种金属元素的质量分数不同,金属卟啉显示出来的颜色色调也不同<sup>[30]</sup>。本研究发现,5种壳色长牡蛎外套膜的颜色明显不同,并且外套膜上Zn、Cu和Mn元素在部分壳色群体之间存在显著性差异,其中Zn元素和Cu元素在壳紫长牡蛎中含量均最高,因而Zn和Cu可能与紫壳的形成有关;Mn元素在壳金长牡蛎中含量最高,表明Mn可能与金壳的形成相关联。同种金属元素在不同壳色长牡蛎中的含量不同且存在显著性差异,从而导致贝壳中的金属卟啉显示出不同颜色。邹柯姝等<sup>[30]</sup>在4种壳色合浦珠母贝中也得出类似的结论。另外,本研究发现,5种壳色长牡蛎与普通对照群体之间在各组织中存在显著性差异。在闭壳肌中,壳橙和壳紫长牡蛎Zn元素含量显著高于对照组;在鳃中,壳金长牡蛎Mn元素含量显著高于对照组;在性腺—内脏团中,壳橙长牡蛎的Zn元素和Cu元素均显著高于对照组群体。这也表明,壳色选育在长牡蛎的金属元素含量方面

产生了积极的影响,也为下一步的选育提供重要的参考指标。

作为滤食性贝类,长牡蛎可以将食物中和水环境中的金属元素富集到各个组织中,因此,长牡蛎可作为环境污染的指示生物。在本研究中综合各组织金属元素含量分析,长牡蛎的不同组织内金属的蓄积能力有较大差异。闭壳肌内各金属元素含量显著低于鳃、外套膜、性腺—内脏团,说明闭壳肌对金属离子的富集能力最弱,Bustamante等<sup>[31]</sup>对法国扇贝(*Chlamys varia*)不同组织金属元素含量进行研究,发现消化腺和肾脏中积累的金属离子最高,而肌肉中含量最低,与本研究结果类似。本研究还发现,长牡蛎各组织对金属元素的富集具有明显的选择性,外套膜对Zn的富集能力显著大于性腺—内脏团和闭壳肌;鳃对Mn的富集能力显著大于性腺—内脏团、外套膜和闭壳肌;性腺—内脏团对Fe的富集能力显著大于鳃、外套膜和闭壳肌。类似的结论在栉孔扇贝相关研究中也发现有发现<sup>[32]</sup>。

本研究发现5种壳色长牡蛎之间以及各壳色与普通对照群体之间部分金属元素含量已表现出分化,不同组织对金属元素的富集具有明显的差异和选择性。研究结果为长牡蛎壳色新品系选育提供重要的基础资料。

#### 参考文献:

- [1] 管云雁,何毛贤.海产经济贝类壳色多态性的研究进展[J].海洋通报,2009,28(1):108-114.  
Guan Y Y, He M X. Progress on shell coloration polymorphism in seashells[J]. Marine Science Bulletin, 2009, 28(1): 108-114(in Chinese).
- [2] Huxley J. Morphism in birds[J]. Acta International Con-

- gress of Ornithology, 1955, 11: 309-328.
- [3] Hoffman E A, Blouin M S. A review of colour and pattern polymorphisms in anurans[J]. Biological Journal of the Linnean Society, 2000, 70(4): 633-665.
- [4] Ishida Y, David V A, Eizirik E, *et al.* A homozygous single-base deletion in *MLPH* causes the *dilute* coat color phenotype in the domestic cat[J]. Genomics, 2006, 88(6): 698-705.
- [5] Renieri C, Valbonesi A, La Manna V, *et al.* Inheritance of coat colour in Merino sheep[J]. Small Ruminant Research, 2008, 74(1-3): 23-29.
- [6] Wohlfarth G W, Rothbard S, Hulata G, *et al.* Inheritance of red body coloration in Taiwanese tilapias and in *Oreochromis mossambicus*[J]. Aquaculture, 1990, 84(3-4): 219-234.
- [7] Johnson S L, Africa D, Walker C, *et al.* Genetic control of adult pigment stripe development in zebrafish[J]. Developmental Biology, 1995, 167(1): 27-33.
- [8] 徐伟, 白庆利, 曹顶臣, 等. 彩鲫、红鲫、银鲫体色发育生物学初步观察[J]. 水产学杂志, 1999, 12(1): 61-63.  
Xu W, Bai Q L, Cao D C, *et al.* Preliminary study on development biology of colored crucian carp, red crucian carp and crucian carp[J]. Chinese Journal of Fisheries, 1999, 12(1): 61-63(in Chinese).
- [9] 王成辉, 项松平, 吕耀平, 等. 瓯江彩鲤红、白两种体色遗传关系的初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(4): 402-405.  
Wang C H, Xiang S P, Lv Y P, *et al.* Preliminary study on inheritance of red and white color phenotypes in Oujiang color carp, *C. carpio* var. *color*[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2008, 17(4): 402-405(in Chinese).
- [10] 吴秀林, 丁炜东, 曹哲明, 等. 不同体色黄鳝生物学特性的研究现状及前景[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2014, 23(3): 80-87.  
Wu X L, Ding W D, Cao Z M, *et al.* Research status and prospects on biological characteristics of *Monopterus albus* with different colors[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2014, 23(3): 80-87(in Chinese).
- [11] 陈炜, 孟宪治, 陶平. 2种壳色皱纹盘鲍营养成分的比较[J]. 中国水产科学, 2004, 11(4): 367-370.  
Chen W, Meng X Z, Tao P. Comparative studies on nutritional composition of abalone *Haliotis discus hannai* between two shell-color stocks[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004, 11(4): 367-370(in Chinese).
- [12] 郑怀平, 张国范, 刘晓, 等. 不同贝壳颜色海湾扇贝(*Argopecten irradians*)家系的建立及生长发育研究[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(6): 632-639.  
Zheng H P, Zhang G F, Liu X, *et al.* Establishment of different shell color lines of bay scallop *Argopecten irradians irradians* Lamarck (1819) and their development [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2003, 34(6): 632-639(in Chinese).
- [13] 朱东丽, 林志华, 董迎辉, 等. 文蛤(*Meretrix meretrix*)4个壳色花纹品系的遗传差异分析[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(3): 374-379.  
Zhu D L, Lin Z H, Dong Y H, *et al.* Genetic variation analysis of four strains of *Meretrix meretrix* that have different shell colors and decorative patterns[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(3): 374-379(in Chinese).
- [14] 丛日浩, 李琪, 葛建龙, 等. 长牡蛎4种壳色家系子代的表型性状比较[J]. 中国水产科学, 2014, 21(3): 494-502.  
Cong R H, Li Q, Ge J L, *et al.* Comparison of phenotypic traits of four shell color families of the Pacific oyster (*Crassostrea gigas*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(3): 494-502(in Chinese).
- [15] Nell J A. The history of oyster farming in Australia[J]. Marine Fisheries Review, 2001, 63(3): 14-25.
- [16] 张跃环, 闫喜武, 张澎, 等. 贝类壳色多态的研究概况及展望[J]. 水产科学, 2008, 27(12): 680-683.  
Zhang Y H, Yan X W, Zhang P, *et al.* Research advances and prospects on shell color polymorphism of mollusks[J]. Fisheries Science, 2008, 27(12): 680-683(in Chinese).
- [17] 朱怡静, 李琪, 张景晓, 等. 5种壳色长牡蛎不同组织常规营养成分分析与评价[J]. 中国水产科学, 2018, 25(2): 354-360.  
Zhu Y J, Li Q, Zhang J X, *et al.* Analysis and evaluation of nutrient compositions in different tissues of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) with five shell colors[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(2): 354-360(in Chinese).
- [18] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.  
Fisheries and Fisheries Administration Bureau of the Ministry of Agriculture. China Fishery Statistical Year-

- book[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016 (in Chinese).
- [19] 王波, 柯才焕, 李卫东, 等. 杂色鲍黄壳色突变体的形态学参数及营养成分分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2015, 54(4): 478-484.
- Wang B, Ke H C, Li W D, *et al.* Studies of morphological parameters and nutritional compositions for yellow shell color variant of *Haliotis diversicolor*[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2015, 54(4): 478-484(in Chinese).
- [20] Orban E, Di Lena G, Masci M, *et al.* Growth, nutritional quality and safety of oysters (*Crassostrea gigas*) cultured in the lagoon of Venice (Italy)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2004, 84(14): 1929-1938.
- [21] Futagawa K, Yoshie-Stark Y, Ogushi M, *et al.* Monthly variation of biochemical composition of Pacific oysters *Crassostrea gigas* from two main cultivation areas in Japan[J]. Fisheries Science, 2011, 77(4): 687-696.
- [22] Wang W J, Yang J M, Li Q, *et al.* Development of calibration models for rapid determination of chemical composition of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Journal of Shellfish Research, 2015, 34(2): 303-309.
- [23] Karnjanapratum S, Benjakul S, Kishimura H, *et al.* Chemical compositions and nutritional value of Asian hard clam (*Meretrix lusoria*) from the coast of Andaman Sea[J]. Food Chemistry, 2013, 141(4): 4138-4145.
- [24] Colakoglu A F, Ormanci B H, Berik N, *et al.* Proximate and elemental composition of *Chamelea gallina* from the southern coast of the Marmara Sea (Turkey)[J]. Biological Trace Element Research, 2011, 143(2): 983-991.
- [25] Dato-Cajegas C R S, Yakupitiyage A. The need for dietary mineral supplementation for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, cultured in a semi-intensive system[J]. Aquaculture, 1996, 144(1-3): 227-237.
- [26] Dabrowska H, Meyer-Burgdorff M, Günther K D. Interaction between dietary protein and magnesium level in tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. Aquaculture, 1989, 76(3-4): 277-291.
- [27] Hambidge M. Human zinc deficiency[J]. The Journal of Nutrition, 2000, 130(5): 1344S-1349S.
- [28] Grantham-McGregor S, Ani C. A review of studies on the effect of iron deficiency on cognitive development in children[J]. The Journal of Nutrition, 2001, 131(2): 649S-666S.
- [29] Williams S T. Molluscan shell colour[J]. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2017, 92(2): 1039-1058.
- [30] 邹柯妹, 张殿昌, 郭华阳, 等. 4种壳色合浦珠母贝贝壳棱柱层和珍珠质层7种金属元素质量分数的比较分析[J]. 南方水产科学, 2015, 11(3): 74-79.
- Zou K S, Zhang D C, Guo H Y, *et al.* Comparison of seven metallic elements in prismatic layer and nacreous layer of shells from four shell color strains in pearl oyster (*Pinctada fucata*)[J]. South China Fisheries Science, 2015, 11(3): 74-79(in Chinese).
- [31] Bustamante P, Miramand P. Evaluation of the variegated scallop *Chlamys varia* as a biomonitor of temporal trends of Cd, Cu, and Zn in the field[J]. Environmental Pollution, 2005, 138(1): 109-120.
- [32] 马元庆, 张秀珍, 孙玉增, 等. 栉孔扇贝对重金属的富集效应研究[J]. 水产学报, 2010, 34(10): 1572-1578.
- Ma Y Q, Zhang X Z, Sun Y Z, *et al.* The research of heavy metal enrichment in *Chlamys farreri*[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(10): 1572-1578(in Chinese).



## Analysis and evaluation of mineral contents in different tissues of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) with five shell colors

ZHU Yijing, LI Qi\*, ZHANG Jingxiao

(Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Abstract:** In order to assess the minerals values of five shell colors (black, purple, orange, golden and white) strains of *Crassostrea gigas* and one control population, the inductively coupled plasma atomic emission spectrometer and visible near-infrared reflectance spectroscopy were used to determine the minerals (Mg, Fe, Zn, Cu, Mn and Se) in different organs (mantle, gill, adductor muscle, and gonad-visceral mass). Results indicated that the purple shell, orange shell and black shell strains showed a significantly higher Zn content than that of control population ( $P<0.05$ ), while the purple shell color strain had significantly higher Cu content than the golden shell color strain and control population ( $P<0.05$ ), but the golden shell color strain showed a significantly higher Mn content compared with the purple shell and black shell color strains in the mantle ( $P<0.05$ ). The golden shell color strain showed significantly higher Mn in gill than the black shell color strain and control population ( $P<0.05$ ), whereas there was no significant difference in other minerals ( $P>0.05$ ). In addition, the orange shell and purple shell color strains had significantly higher Zn content than the control population in adductor muscle ( $P<0.05$ ). When considering the minerals in gonad-visceral mass, the orange shell color strain showed significantly higher Zn and Mn contents than the control population ( $P<0.05$ ), and had significantly higher Cu content than the golden shell color strain ( $P<0.05$ ). Mineral contents displayed significant difference among the four tissues. The contents of minerals in adductor muscle were significantly lower than those in mantle, gill and gonad-visceral mass ( $P<0.05$ ). These results indicated that minerals significantly changed in the process of selective breeding, providing useful information for developing shell color strains in future.

**Key words:** *Crassostrea gigas*; shell color; minerals; selective breeding

**Corresponding author:** LI Qi. E-mail: qili66@ouc.edu.cn

**Funding projects:** Key Research and Development Program of Shandong Province (2016ZDJS06A06); Industrial Development Project of Qingdao City (17-3-3-64-nsh)